

溶接金属中酸素量を低減する GMA 溶接法の開発

Development of the GMA Welding Process with Low Oxygen Content in Weld Metal

高橋 誠*	佐藤 豊幸*	北村 祐一郎**
TAKAHASHI Makoto	SATOH Toyoyuki	KITAMURA Yuichiro
中村 照美***	平岡 和雄***	
NAKAMURA Terumi	HIRAOKA Kazuo	

軟鋼 GMA 溶接において、アーク安定を維持し溶接金属中の酸素量低減が可能なガスシールド方法について検討した。2種類のシールドガスを同時に供給可能なノズルを使用し、主シールドガスに Ar、添加ガスに Ar+O₂を用いることで、安定ビードで溶接金属中の酸素量 100 wt ppm 以下を達成し、シールドガスの適正流量範囲を把握した。アーク安定には陰極点を溶融池近傍に形成させることが重要であり、溶融池近傍に選択的に酸素を供給することが有効であると考えられる。

In GMA welding with mild steel, we studied the gas shielding method in which arc stability was maintained well and oxygen content in weld metal could be reduced. Very low oxygen content, less than 100 wtppm, in weld metal along with the stable arc was achieved by using a nozzle specially designed to supply two kind of shielding gases, that is Ar for main shielding gas and Ar+O₂ for additional gas. On the condition above, the suitable flow rate was clarified. It is essential for arc stability to form a cathode spot near the molten pool, thus it is expected to be effective that oxygen is supplied intentionally as near as the molten pool.

1. はじめに

鉄鋼材料を対象とした GMA 溶接部の機械的性質改善、特にじん性改善において溶接金属（溶接ビード）中の酸素量低減は有効な手段である。近年注目されている低変態溶接材料¹⁾においても、低温じん性の改善が課題として挙げられている²⁾。溶接金属中の酸素量低減にはシールドガス中の酸化性ガス濃度低減が効果的である³⁾と考えられるが、単に炭酸ガスや酸素の組成比を下げるとアーク安定性を損なうこととなり、通常の方法では良好な溶接施工は不可能である。

そこで、アーク安定性を損なうことなく、溶接金属中の酸素量を低減することを目的とした GMA 溶接におけるガスシールド方法の検討を行った。具体的には、2種類のガスを供給できるノズルを使用し、溶接金属中の酸素量 100wtppm 以下を目指した。

* 開発・エンジニアリング本部山梨研究所溶接技術センター
 ** 開発・エンジニアリング本部つくば研究所シミュレーションセンター
 *** 物質・材料研究機構超鉄鋼研究センター

2. 実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。通常の方法は単一のシールドガスをノズルに供給する構造であるのに対して、本法では2種類のガスをノズル内に同時に供給できる構造を有していることが特徴で

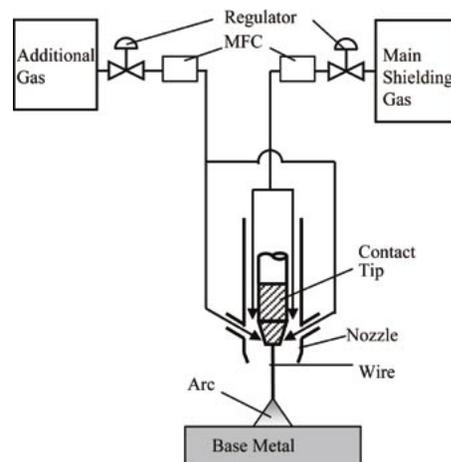


Fig. 1 Experimental apparatus.

ある。主シールドガス、添加ガスともに圧力調整器により減圧され、マスフローコントローラ (MFC) により所定の流量に調整される。その後、それぞれの流路から定常的にノズル内に供給される構造となっている。従って、主シールドガスと添加ガスはそれぞれ別々にノズル内に供給されるため、使用するガス組成、流量などは自由に調整することが可能である。ノズルは交換が可能な構造となっている。

本装置はトーチが固定であり、母材が走行台車により移動する形態の自動溶接機である。ワイヤ送給性に優れておりアーク安定性の評価に適した装置である。

2.2 ノズル形状

Fig. 2 に本実験に用いたノズルの詳細図を示す。ノズル内にリング状の流路を配置し、このリング下部に等間隔に4つのガス添加口を設けた構造となっている。主シールドガスは通常ノズルと同様にノズル上部から供給されチップボディに沿って流れる。主シールドガスとは異なる添加ガスは、ガス添加口よりノズル内に直接供給される。よって本ノズルは2種類のガスを別々にノズル内に供給できる構造となっている。

ガス添加口形状は3通りとした。ガス添加口断面積 2.55 mm^2 /穴 (穴径 $\phi 1.8 \text{ mm}$) のノズルを主に使用し適正流量範囲の把握実験を行った。さらにガス添加口断面積の影響を検討するため、 1.13 mm^2 /穴 (穴径 $\phi 1.2 \text{ mm}$, 断面積 1/2 相当) および 5.25 mm^2 /穴 (穴径 $\phi 1.8 \text{ mm}$ 長穴, 断面積 2 倍相当) についても評価を

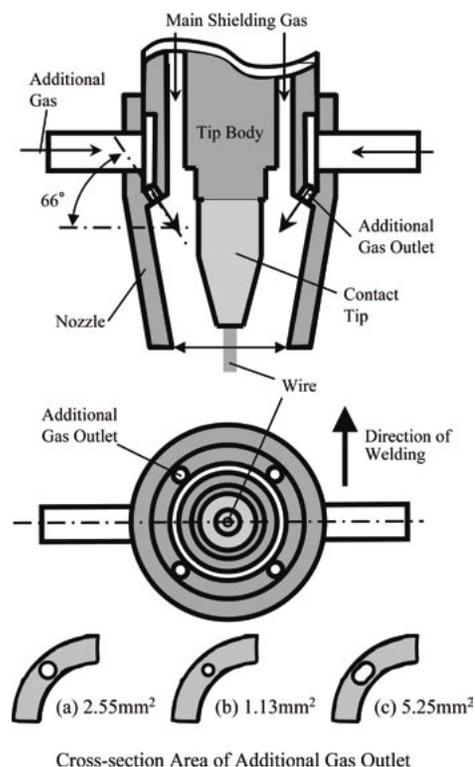


Fig. 2 Schematic of experimental nozzle.

行った。

2.3 供試材および実験条件

Table 1 に実験に用いた母材およびワイヤ中の酸素量と窒素量を示す。母材には SM490A を使用し、ワイヤは市販の YGW15 相当品 $\phi 1.2 \text{ mm}$ を使用した。

Table 2 に実験条件を示す。主シールドガスとして Ar を用い、添加ガスとして $\text{Ar} + \text{O}_2$ 混合ガスを用いた。添加ガス酸素濃度を 2, 3, 5, 7 vol% と変換させ、各添加ガス組成に対してアーク安定性と溶接金属中の酸素量低減効果が得られる適正流量範囲を求める実験を行った。実験はワイヤ送給速度一定とし、スプレーアーク条件下でビードオンプレート溶接にて行った。アーク電圧については、添加ガス組成および流量に合わせて、スプレー化下限電圧 + 1V となるように適宜設定した。スプレーアークの状態はアーク観察と電流電圧波形から判定し、溶接中に短絡状態を生じなくなる条件をスプレー化下限電圧と判断した。

溶接金属中の酸素量および窒素量の測定には以下の方法を採用した。

酸素量測定：不活性ガス融解－赤外線吸収法

JIS H1620 (6)

窒素量測定：不活性ガス融解－熱伝導法

JIS G1228 (4)

Table 1 Oxygen and nitrogen contents of base metal and wire.

	O (wt ppm)	N (wt ppm)
Base Metal (SM490A t12mm)	10 ~ 19	40 ~ 54
Wire (YGW15 $\phi 1.2 \text{ mm}$)	31 ~ 35	29 ~ 33

Table 2 Experimental condition.

Welding Process	GMAW
Extension Length	19 mm
Welding Position	Flat Position
Wire Feeding Rate	225 mm/s (350 ~ 380 A)
Arc Voltage	28 ~ 38 V
Welding Speed	450 mm/min
Main Shielding Gas	Ar : 15, 20, 25 L/min
Additional Gas	Ar + 2 ~ 7 vol% O_2 : 1 ~ 9 L/min

3. 実験結果および考察

3.1 従来ガスシールド方法での溶接金属中酸素量

はじめに、本実験結果を評価するための比較対象となる、通常ガスシールド方法における溶接金属中の酸素量の下限把握実験を実施した。シールドガス組成は $\text{Ar} + \text{O}_2$ 混合ガスと $\text{Ar} + \text{CO}_2$ 混合ガスの2種類とし、酸素もしくは炭酸ガス濃度と溶接金属中の酸素量との関係性を求めた。ワイヤ送給速度、アーク電圧、溶接速度などの実験条件は Table 2 に準じた。Fig. 3 に結

果を示す。横軸はシールドガスの酸素もしくは炭酸ガス濃度である。アークが不安定なものに*を付した。Ar+1 vol% O₂と Ar+2 vol% CO₂ではアークは不安定となり、シールドガス中の酸素もしくは炭酸ガス濃度が低すぎるためシールドガス組成として不適であることが分かった。

アークが安定である状態でのシールドガス組成の下限はそれぞれ Ar+2 vol% O₂および Ar+5 vol% CO₂である。

このときの溶接金属中の酸素量はそれぞれ 150 wtppm, 168 wtppm であった。また溶接金属中の窒素量についてはいずれも母材と同程度の良好な値であり、大気巻込みはないと考えられる。従って、通常の方法でアークが安定な範囲においては、150 wtppm 程度が溶接金属中酸素量の下限であると判断し、本開発では 100 wtppm 以下に低減することを目標とした。

また、Ar+CO₂に比べて Ar+O₂の方がシールドガス中の酸化性ガス濃度が低くてもアークを安定させる効果が得られていることから、本開発での添加ガス組成として Ar+O₂を用いることとした。

Fig. 4には Ar+2 vol% O₂でのビード外観を示す。ビード止端部の揃った良好なビード外観であった。

3.2 本開発方法での溶接金属中酸素量低減効果

本開発で検討した新ノズルを用いて溶接実験を行った結果について示す。主シールドガスに Ar, 添加ガスに Ar+2~7 vol% O₂を用いた。Fig. 5 (a)には主シールドガス流量 20 L/min における添加ガス流量と溶接

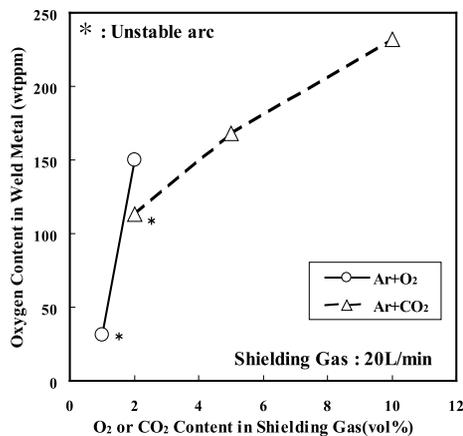


Fig. 3 Minimum O₂ or CO₂ contents in shielding gas. (conventional nozzle)

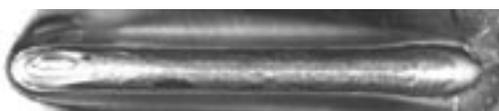
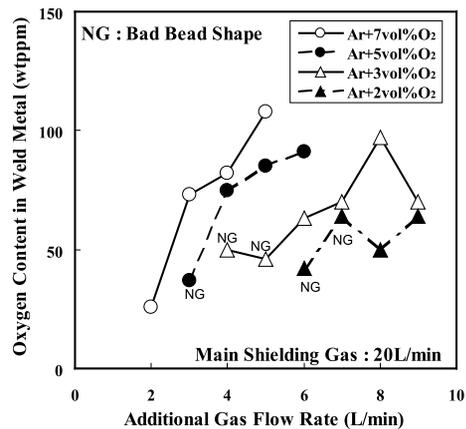


Fig. 4 Bead shape with good welding condition. (Ar-2vol%O₂, conventional nozzle)

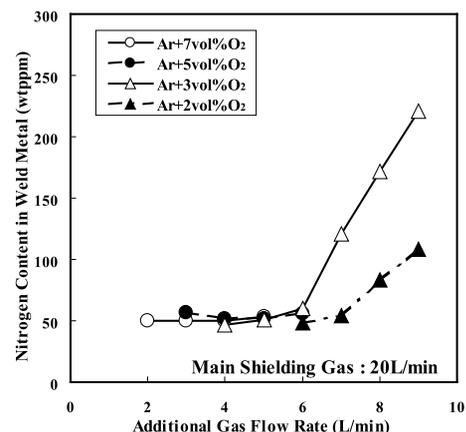
金属中の酸素量の関係を, Fig. 5 (b) には同じく溶接金属中の窒素量との関係を示す。横軸は添加ガス流量である。また図中に付した NG はビード形状不良を示している。

いずれの添加ガスにおいても、添加ガス流量の増加に伴い溶接金属中の酸素量は高くなる傾向を示した。また、添加ガス中の酸素濃度が高くなると、同一流量での溶接金属中の酸素量は高くなり、ビード形状が低流量でも良好となることがわかった。いずれの添加ガスも、Fig. 5 (a) に値を示した流量範囲でアークは概ね安定していたが、この流量未満ではアークは非常に不安定となった。本実験から適正な添加ガス流量とすることで、溶接金属中の酸素量を 100 wtppm 以下にすることが可能であることがわかった。

溶接金属中の窒素量については Fig. 5 (b) に示す通り、添加ガス Ar+5 vol% O₂, Ar+7 vol% O₂では 60 wtppm 以下と増加はなく良好であったが、添加ガス Ar+2 vol% O₂, Ar+3 vol% O₂では、添加ガス流量が増えると大幅な窒素の増加が見られた。添加ガス Ar+2 vol% O₂, Ar+3 vol% O₂では、添加ガス中の酸素濃度が低すぎるため、アークを安定させるために添



(a) Oxygen content



(b) Nitrogen content

Fig. 5 Influence of additional gas flow rate on oxygen and nitrogen contents in weld metal.

加ガス流量を多くする必要が生じ、これによりシールド状態が乱れ大気の巻込みが起こり、窒素量が大幅に増加したものと考えられる。

Fig. 6 にビード形状不良の一例を示す。Fig. 6 (a) (b) ともに主シールドガス流量、添加ガス流量は同一である。添加ガス Ar+5 vol%O₂ を用いた Fig. 6 (a) は、止端部が揃った良好なビード形状であった。これに対して添加ガス Ar+2 vol%O₂ を用いた Fig. 6 (b) は、止端部が不揃いで蛇行しビード不整であった。ビード両脇には幅広いクリーニング域も見られた。溶接時はアーク不安定で、アークのふらつきや不規則な短絡が生じていた。つまり添加ガスから供給される酸素が少なすぎるにより、母材側のアーク起点となるべき陰極点が安定しないことが原因であると考えられる。Fig. 5 (a) に NG で示した各流量条件についても同様の原因によりアークが若干不安定であったものと思われる。

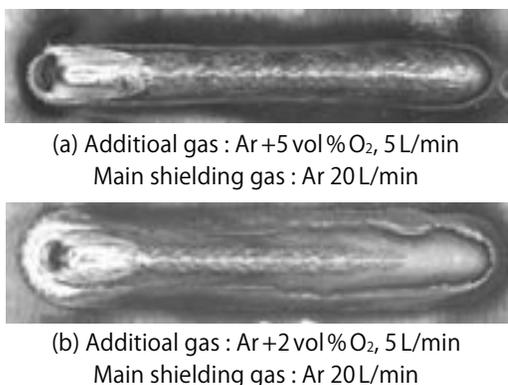


Fig. 6 Relationship between additional gas composition and bead shape.

以上の結果をもとに、溶接金属中の酸素量 100 wt ppm 以下、窒素量 60 wt ppm 以下であり、アーク安定性、ビード形状ともに良好であると判断される総合的な適正流量範囲を求めた。主シールドガス流量は 15, 20, 25 L/min の3条件とした。その結果を Fig. 7 に示す。

斜線で示している囲まれた範囲内が各添加ガスの適正領域である。主シールドガス流量に合わせた適正な添加ガス流量に調整することにより、アーク安定性を維持しつつ溶接金属中の酸素量 100 wt ppm 以下となる、良好な GMA 溶接が可能な領域が存在することが分かった。添加ガス Ar+5 vol% O₂, Ar+7 vol% O₂ は適正流量幅が 2~3 L/min 程度と広く、また、添加ガスが比較的低流量でもアークの安定が図れるなど良好なガス組成であった。これに対して、添加ガス Ar+3 vol% O₂ は適正流量範囲が非常に狭く、添加ガス Ar+2 vol% O₂ では適正流量範囲は存在しなかった。不適正となる主な要因は Ar+2 vol% O₂,

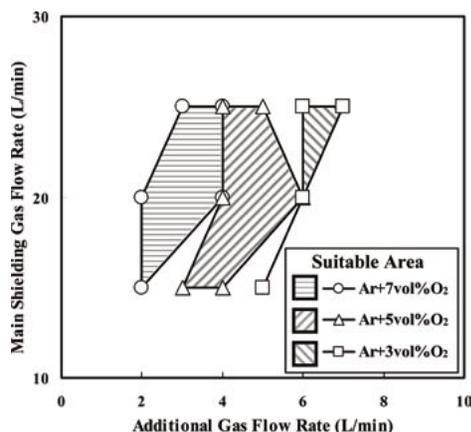


Fig. 7 Suitable area of flow rate.

Ar+3 vol% O₂ では、ビード形状不良と窒素量の増加であった。ところが、添加ガス中の酸素濃度が高い Ar+5 vol% O₂, Ar+7 vol% O₂ では、溶接金属中の酸素量増加が主な不適正要因であった。その反面アークは安定し易くシールド状態も良好であると言える。ただし、添加ガス中の酸素濃度が 7 vol% より高く適正な添加ガス流量範囲が 1 L/min 以下となるような添加ガス組成では、添加ガスを微量とする必要があり、流量制御が難しくなることも予想される。

3.3 ガス添加口断面積の影響

本ガスシールド方法においては、ノズル形状も重要な要素の一つである。そこで適正な添加口断面積を把握するために、Fig. 2 に示した3種類の異なるガス添加口について、添加ガスの適正流量範囲の比較を行った。

ガス添加口断面積ごとの添加ガス流量と溶接金属中の酸素量の関係を Fig. 8 (a) に、窒素量の関係を Fig. 8 (b) に示す。主シールドガス流量は 20 L/min, 添加ガスには Ar+5 vol% O₂ を用いた。

図中に値を示した流量範囲でアークは概ね安定していたが、この流量未満ではアークは非常に不安定となった。添加ガス流量を見ると、ガス添加口断面積 2.55 mm²/穴については 3~5 L/min, 断面積 5.25 mm²/穴については 4~5 L/min で溶接金属中の酸素量は 100 wt ppm 以下、溶存窒素濃度も 60 wt ppm 以下となり、アーク安定性、ビード形状を含めて適正流量範囲であった。断面積 5.25 mm²/穴は、主として実験を行った断面積 2.55 mm²/穴に比べて約 2 倍の断面積であり、同一流量では添加ガス出口での流速が約 1/2 倍と異なるが、両者の適正流量範囲に大きな違いは見られず、不適正の判定要因も、低流量側はアーク不安定やビード形状不良、大流量側は酸素量 100 wt ppm 超であり類似な傾向であった。

これに対してガス添加口断面積 1.13 mm²/穴の場合は、添加ガス Ar+5 vol% O₂ においては適正流量範

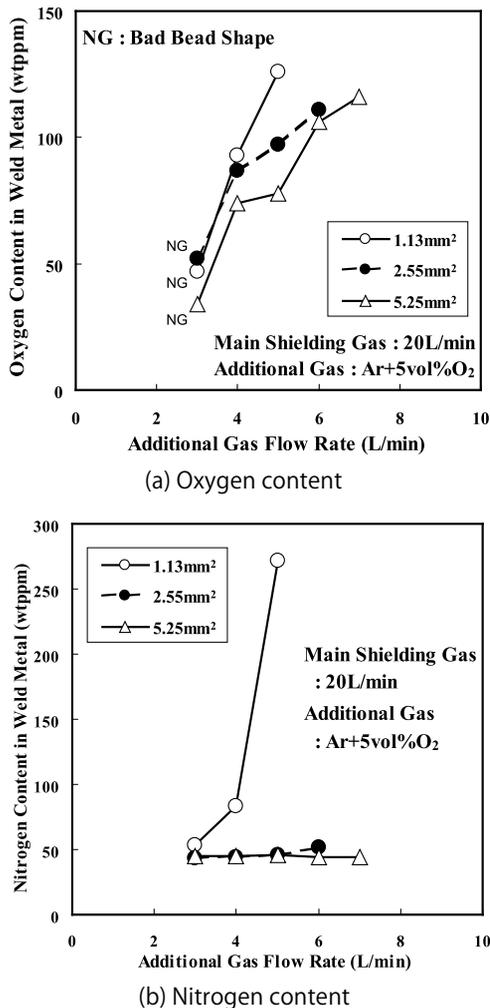


Fig. 8 Influence of additional gas inlet shape on oxygen and nitrogen contents in weld metal.

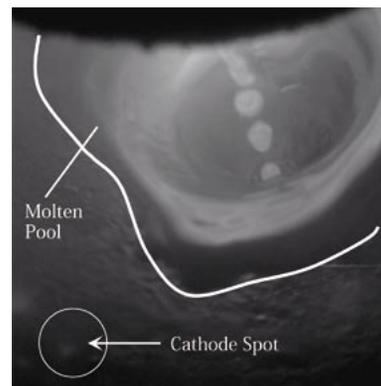
囲が存在しなかった。添加ガス流量が3L/minでは止端部不揃いによるビード形状不良が見られ、4L/min以上では溶存窒素濃度の増加が見られた。これは、ガス添加口断面積が1.13 mm²/穴と非常に細くなったため、添加ガスの流速が速く動圧が大きくなり、シールド状態やアークプラズマ形状を乱すことで大気の影響を生じやすくなっていることが考えられる。シールド状態の観点からガス添加口断面積1.13 mm²/穴は不適と考えられ、断面積2.55 mm²/穴から5.25 mm²/穴については適正なガス添加口断面積の範囲であると思われる。

3.4 陰極点の形成状態がビード形状に及ぼす影響

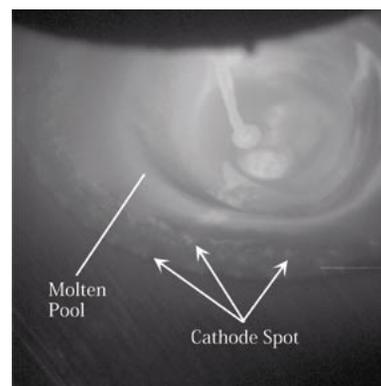
アークはワイヤを陽極とし、母材を陰極として発生している。よってアークの安定性については、溶接中の母材側に形成される陰極点の安定状態が大きく関係していると思われるため、高速度ビデオカメラによる溶融池観察を行った。Fig. 9 (a) (b) に主シールドガス20L/min、添加ガスAr+7 vol% O₂における、添加ガス流量と陰極点の関係を示す。添加ガス流

量1L/minのFig. 9 (a)ではアークは不安定でビード形状不良であり、前述のFig. 6 (b)に類似した止端部が不揃いで広範囲のクリーニング域が見られるビードであった。これに対して添加ガス流量4L/minのFig. 9 (b)は、アーク安定性、ビード形状ともに良好であった。Fig. 9 (a)から陰極点の形成位置は、溶融池から離れた遠い点に広範囲に散在しており、実験時の観察では陰極点が迷走し集中した場所に形成されることはなかった。この広範囲に陰極点が迷走する領域がクリーニング域になるものと思われる。陰極点がふらつくことにより、当然アークも不安定になることから、ビード形状も止端部が不揃いな不安定な形状となったと考えられる。

Fig. 9 (b)に示す通り、添加ガス流量を増すと陰極点は溶融池外縁に集中して形成されるようになる。アークは安定し、ビード形状も止端部の揃った良好な形状となり、クリーニング域はほとんど見られない。この現象は、添加ガス流量を増すことにより溶融池外縁部に供給される酸素量が増え、陰極点の起点となる酸化が増えることにより、陰極点が安定的に集中して形成されるためと考えられる。溶接金属中の窒素量



(a) Additional gas : Ar+7 vol% O₂, 1L/min
Main shielding gas : Ar 20L/min



(b) Additional gas : Ar+7 vol% O₂, 4L/min
Main shielding gas : Ar 20L/min

Fig. 9 Relationship between cathode spot and additional gas flow rate.

が高い流量条件の場合も、陰極点はやはり溶融池遠方に散在する状態であったことから、アーク不安定によりシールド不良になっていたと考えられる。

以上から添加ガスの条件により、陰極点の形成状態は大きく異なることがわかった。アークが安定であり、良好なビード形状であり、溶接金属中の酸素量の増加を生じさせないためには、陰極点が溶融池外縁部に集中し広範囲なクリーニング域が生じないような添加ガス流量条件とすることが好ましい。

3.5 アーク安定と酸素量低減を両立できる要因

ノズル内での酸素濃度分布の状態について検討を行うため、ノズル内におけるガス流動およびガス組成濃度分布シミュレーションをアークが存在しない状態で行った。実際の溶接状況ではアークのプラズマ気流などの影響により流動状況が異なるため、ガス組成濃度分布に差異を生ずると予想されるが、定性的な分布は同様の傾向を示すと考えられる。

Fig. 10にガス添加口断面積 2.55 mm^2 /穴であり、適正流量条件の主シールドガス 20 L/min 、添加ガス組成 $\text{Ar}+7\text{ vol}\%\text{O}_2:3\text{ L/min}$ における、ガス添加口を有する鉛直断面の酸素濃度分布を示す。濃度は色分け表示されており、白・赤に近いほど値が大きく、青・黒に近いほど小さい。溶融池観察から溶融池幅 15 mm 、ワイヤの溶融開始位置(≒アーク長) 3.5 mm と仮定して溶融池幅とアーク長の三角形を図中に記入した。

ノズル中央部では酸素濃度が低く、ノズル内壁側へ向かって徐々に酸素濃度が高くなることがわかる。溶融池両端とワイヤ溶融開始位置とでは明確に酸素濃度の違いが生じていることが確認できた。

Fig. 11に、溶接金属中酸素量低減機構の概念図を示す。主シールドガスがチップ、陽極(ワイヤ先端部)、溶滴、溶融池中央部を覆うように流れ、高温のアーク中央部はほとんど酸素が存在しない雰囲気となる。添加ガスから供給される酸素は徐々に拡散するが、主

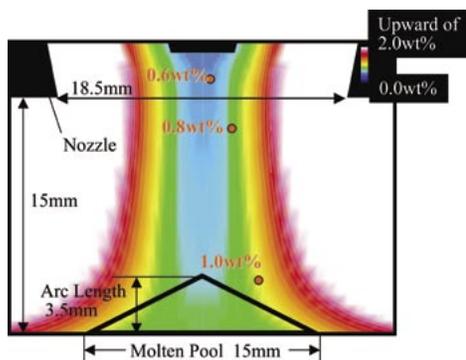


Fig. 10 Simulation result of oxygen distribution in shielding gas.

シールドガス外側に多く存在し、溶融池外縁部に運ばれる。

アーク安定には陰極点が形成される溶融池外縁部に酸素を供給し、溶接金属中の酸素量低減にはアーク中央部の溶滴や溶融池に過剰な酸素が侵入することを防ぐことが有効と考え、これにより溶接金属中の酸素量低減効果が得られているものと推察する。

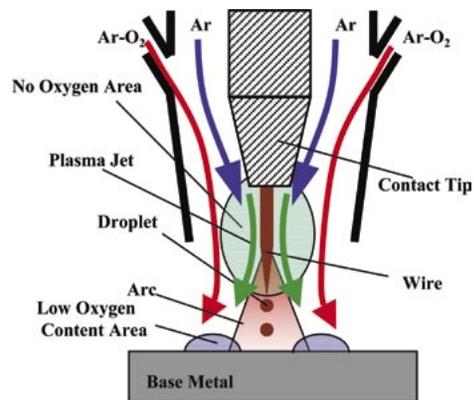


Fig. 11 Schematic of low oxygen content GMAW.

4. まとめ

本実験の範囲内において、以下のことが分かった。

- (1) 本開発のガスシールド方法により、アーク安定と溶接金属中の酸素量 100 wt ppm 以下を両立するGMA溶接が可能となった。
- (2) ガス添加口断面積 2.55 mm^2 /穴のノズルについて、主シールドガス流量と添加ガス組成および添加ガス流量の関係を明らかにし、溶接金属中の酸素量低減効果があるシールドガス適正流量範囲を把握した。
- (3) ガス添加口断面積 1.13 mm^2 /穴のノズルはガスシールド状態を乱しやすく、ガス添加口断面積としては不適であった。ガス添加口断面積 2.55 mm^2 /穴から 5.25 mm^2 /穴が添加口断面積としては適正であった。
- (4) シールドガス流量条件により、陰極点の形成位置は大きく異なることがわかった。アークが安定し、かつ良好なビード形状を得るには、陰極点が溶融池外縁部に集中するような流量条件が適切である。

参考文献

- 1) 銭谷哲, 早川直哉, 山本純司, 平岡和雄, 森影康, 久保宏, 安田功一, 天野虔一. 溶接構造シンポジウム2002講演文集. 346-353 (2002).
- 2) 早川直哉. 溶接学会全国大会講演概要. 72, F9-F12 (2003).
- 3) 中村照美, 平岡和雄, 高橋誠, 佐々木智章. 溶接学会論文集. 20 (2), 237-245 (2002).